



**HAL**  
open science

# Optimiser l'équité dans les réseaux LoRaWAN

Christelle Caillouet, Martin Heusse, Franck Rousseau

► **To cite this version:**

Christelle Caillouet, Martin Heusse, Franck Rousseau. Optimiser l'équité dans les réseaux LoRaWAN. CORES 2021 - 6ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, May 2021, La Rochelle, France. hal-03213988

**HAL Id: hal-03213988**

**<https://hal.science/hal-03213988v1>**

Submitted on 30 Apr 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimiser l'équité dans les réseaux LoRaWAN

Christelle Caillouet<sup>1</sup> et Martin Heusse<sup>2</sup> et Franck Rousseau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ. Côte d'Azur, CNRS, I3S, Inria, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, Saint Martin d'Hères

Nous présentons un modèle d'optimisation pour la planification d'un réseau LoRa avec une passerelle, dont le but est de déterminer les bornes des zones de facteur d'étalement (SF) de manière à maximiser le taux de livraison des paquets (PDR) minimum des nœuds du réseau. Grâce à notre modèle, nous améliorons le PDR minimum de plus de 13% en comparaison de l'allocation usuelle des SFs basée sur un seuil signal sur bruit (SNR). Nous étudions enfin le compromis entre temps de résolution et précision de la solution afin de valider notre modèle lorsque la densité des nœuds augmente.

**Mots-clefs :** LoRaWAN, optimization, fairness

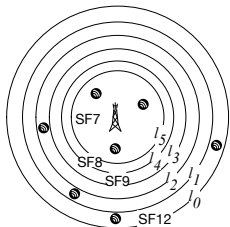
## 1 Introduction

Les réseaux étendus à faible puissance LoRa permettent des communications à longue distance pour les applications de l'Internet des objets (IoT). La couche physique LoRa utilise le CSS (Chirp Spread Spectrum) pour une communication robuste dans la bande sub-GHz ISM. LoRaWAN définit une méthode d'accès au canal basée sur ALOHA. Chaque nœud du réseau utilise un facteur d'étalement (*Spreading Factor*) permettant d'adapter le débit en fonction de la distance à la passerelle.

Les performances de LoRaWAN font l'objet de nombreux travaux, dont [GR17, HAC<sup>+</sup>20]. Différents modèles ont été proposés et tentent d'estimer les effets des collisions entre les transmissions se produisant dans le même SF et le même canal, qui sont très nuisibles aux performances du réseau. L'atténuation ou les collisions ont des effets antagonistes, car le passage à un SF plus important entraîne des transmissions plus robustes mais de plus longue durée, ce qui augmente la contention, donc la probabilité de collision. Nous allons voir qu'il est sage de contrôler le nombre de nœuds utilisant des SF plus élevés car ils occupent une capacité de canal beaucoup plus importante que les nœuds ayant des SF plus faibles.

Afin d'améliorer les performances des réseaux LoRaWAN, des méthodes d'optimisation des ressources pour l'allocation des SF ont été proposées [CHR19, ZPM<sup>+</sup>18, AKRG19]. Nous étudions cette question sous un angle légèrement différent. Nous cherchons à équilibrer le taux de livraison de paquets (PDR) dans le réseau pour assurer l'équité entre les nœuds en répartissant correctement les facteurs d'étalement (SF), sur la base d'un modèle de système précis tenant compte à la fois de l'atténuation et collisions pour obtenir une formule de PDR représentative.

FIGURE 1: Anneaux des SFs autour de la passerelle et notations.



Densité spatiale des nœuds	$\rho$
Intensité de la génération du trafic	$\lambda_r$
Durée d'une transmission à SF(12 - j)	$\tau_j$
Distance du nœud le plus éloigné utilisant SF(12 - j)	$l_j$
Charge présentée au canal au SF(12 - j) (en Erlang)	$v_j$
Gain moyen du canal à la distance d	$g(d)$
Seuil du SNR pour le SF(12 - j)	$q_j$
Puissance de transmission, puissance du bruit dans la bande	$P, N$
Probabilité de succès, du fait de l'atténuation, des évanouissement, du bruit thermique	$H$
Probabilité de succès, du fait des collisions	$Q$

## 2 Hypothèses et modèle d'optimisation

Nous considérons une seule passerelle pouvant transmettre jusqu'à un rayon de  $l_0 = R$ , et  $n$  nœuds répartis de manière homogène avec une densité spatiale  $\rho = n/(\pi \times R^2)$  sur le disque de rayon  $R$ . Le nombre de nœuds alloués au SF(12 -  $j$ ) est fonction des rayons  $l_{j+1}$  et  $l_j$  définissant les anneaux autour de la passerelle (Figure 1).

Notre métrique de performances est le taux de livraison des paquets  $PDR = H \times Q$ , où  $H$  est la probabilité qu'un message soit reçu avec une puissance suffisante par rapport à la sensibilité de la passerelle, et  $Q$  est la probabilité que la trame ne soit pas perdue du fait d'une collision avec une autre trame.

Nous considérons un canal multitrajet de Rayleigh, dont la distribution des puissances suit une loi exponentielle de moyenne 1. Dans ce cas,  $H = \exp(-\frac{Nq_j}{P_{TX}})$ , où  $N$  est la puissance du bruit dans la bande de 125 kHz considérée (-123 dBm),  $q_j$  est la sensibilité de la passerelle pour le SF  $j$ , et  $P_{TX} = P_{TX}g(d)$  est la puissance reçue à la distance  $d$ .

Pour le calcul de  $Q$  nous distinguons 3 cas pour une trame donnée :

1. elle ne subit la concurrence d'aucune autre trame, elle est donc reçue avec la probabilité  $HQ_1$  ;
2. une seule autre trame est présente et il est possible que la trame considérée domine cette interférence avec une probabilité (probabilité  $Q_2$ ) ;
3. plus d'une autre trame est présente et la trame est perdue, la probabilité de prévaloir étant très faible.

$Q_1$  correspond à la probabilité de succès sur un canal Aloha :  $Q_1 = \exp(-2v_j)$  : aucune autre trame ne doit arriver pendant une durée de  $\tau_j$  de part et d'autre du début de la réception de la trame considérée, où  $v_j = n_j \tau_j \lambda_t$ . Nous fixons  $\lambda_t$  à l'intensité maximum pour tous les nœuds envoyant des trames de 59 octets, qui est déterminé par ceux à SF12 à la limite de leur cycle d'utilisation, soit  $\lambda_t = \frac{1}{2.47 \times 3 \times 100} s^{-1}$  pour 0.33% de *duty cycle* dans les 3 canaux de la bande de fréquence.

$Q_2$  est le produit des probabilités d'avoir une unique autre trame en présence, soit  $2v_j \exp(-2v_j)$ , avec celle qu'une trame donnée domine une autre trame de 6 dB quand leurs puissances suivent une distribution exponentielle. Cette dernière probabilité est  $\frac{1}{x+1}$  pour un facteur  $x$  (car 6 dB de plus correspond au fait d'être 4 fois plus puissant, soit  $x = 4$ ), et donc  $Q_2 = \frac{2}{5} v_j \exp(-2v_j)$ .

Nous avons donc :

$$Q = Q_1 + Q_2 = (1 + \frac{2}{5} v_j) \exp(-2v_j). \quad (1)$$

### 2.1 Bornes équitables

Étant donnée la densité  $\rho$  des nœuds, nous cherchons ici à adapter les bornes  $l_j$ ,  $j = 1, \dots, 5$ , des SFs de manière à maximiser le PDR minimum au niveau de ces bornes, et donc dans le réseau. Nous discrétisons le rayon de transmission  $[0, l_0]$  en  $D$  éléments correspondant aux valeurs possibles pour les  $l_j$ . Le nombre d'échantillons  $|D|$  est fixé en entrée du problème.

Soient  $x_d^j$  la variable binaire indiquant si  $l_j$  est fixé à la distance  $d \in D$  ou non. Le programme linéaire pour allouer équitablement les SF est le suivant :

$$\begin{aligned} \max \min_{j=0, \dots, 5} \sum_{d \in D} e^{(-\frac{Nq_j}{P_{TX} \times g(d)})} x_d^j \times \sum_{d' < d} (1 + \frac{2}{5} v_j) e^{(-2v_j)} x_{d'}^{j+1} & \quad (2) \\ t.q. \quad \sum_{d \in D} x_d^j = 1 & \quad \forall j = 1, \dots, 5 & \quad (3) \\ x_{l_0}^0 = 1 & \quad (4) \\ x_d^j \in \{0, 1\} & \quad \forall d \in D, j = 0, \dots, 5 & \quad (5) \end{aligned}$$

Les contraintes assurent qu'une seule distance est allouée à chaque borne  $l_j$  (Constraints (3)), et nous fixons la limite de SF12 au rayon de communication maximum  $l_0$  (Constraints (4)). La fonction objectif (2) reprend la formule du PDR de la section précédente afin de maximiser le PDR minimum parmi toutes les distances choisies pour les  $l_j$ ,  $j = 1, \dots, 5$ . Nous linéarisons cette équation en introduisant des variables binaires  $y_{dd'}^j = x_d^j \times x_{d'}^{j+1}$ . Le modèle linéaire ainsi obtenu est résolu à l'aide du solveur IBM Cplex.

TABLE 1: Limites des SFs basées sur SNR (km)

$H_{target}$	SF7 $l_5$	SF8 $l_4$	SF9 $l_3$	SF10 $l_2$	SF11 $l_1$	SF12 $l_0$	Cell surface
99.4%	1.05	1.26	1.52	1.83	2.14	<b>2.50</b>	20
92%	2.10	2.53	3.05	3.67	4.28	<b>5.00</b>	79
74%	2.94	3.54	4.27	5.14	5.99	<b>7.00</b>	154
$\tau_j$ (ms)	102.7	184.8	328.7	616.5	1315	2466	↑
$q_j$ (dB)	-6	-9	-12	-15	-17.5	-20	(km <sup>2</sup> )

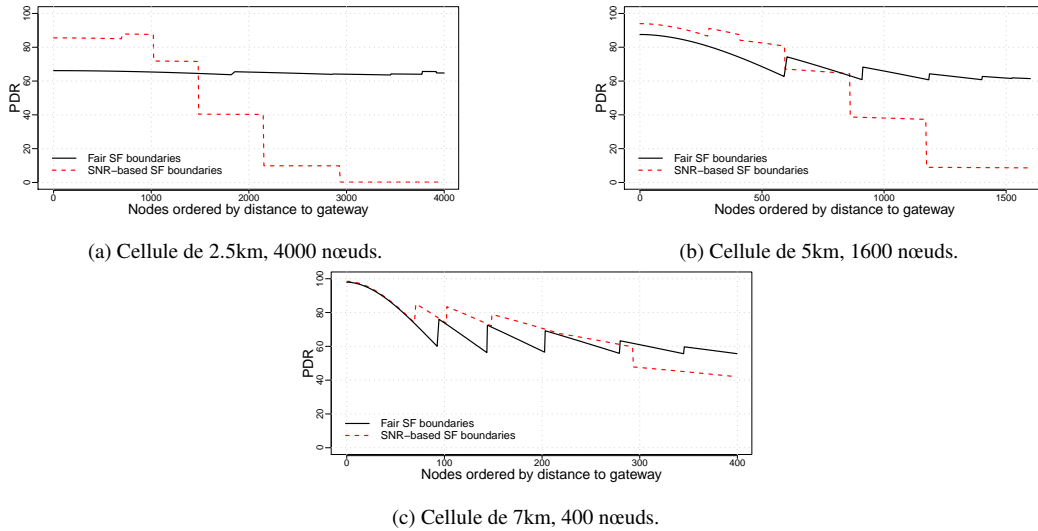


FIGURE 2: PDR des nœuds en fonction de la distance.

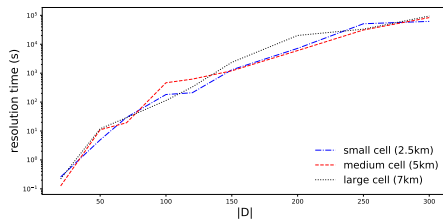
### 3 Résultats

Notre modèle s'applique pour toute taille de cellule. Nous analysons ici les résultats pour 3 scénarios : des cellules de 2.5, 5, et 7 km. Pour chaque scénario, nous prenons les échantillons  $d_i = l_0 \times \sqrt{i/|D|}$ , pour  $i = 1, \dots, |D|$  afin de proposer des limites de même aire pour les SFs, telles que les limites pour les grands SFs loin de la passerelle seront plus rapprochées les unes des autres. Nous comparons les bornes trouvées par notre programme linéaire (*Fair SF boundaries*) avec un modèle basé sur le SNR où les SF sont alloués en fonction de la distance à la gateway et à une valeur cible de la probabilité de transmission  $H_{target}$  (*SNR-based SF boundaries*). Lorsque l'on s'éloigne de la passerelle, le SF est incrémenté à chaque fois que la valeur de  $H$  passe sous  $H_{target}$  (Table 1).

Notre optimisation permet d'équilibrer l'impact de l'atténuation et des collisions afin d'obtenir un taux de perte équivalent pour tous les nœuds, contrairement au modèle basé sur le SNR (Table 2). Pour les petites

TABLE 2: Limites équitables des SFs (km)

$H_{min}$	SF7 $l_5$	SF8 $l_4$	SF9 $l_3$	SF10 $l_2$	SF11 $l_1$	SF12 $l_0$
95.7%	1.70	2.11	2.32	2.43	2.47	<b>2.50</b>
68.9%	3.03	3.77	4.30	4.68	4.88	<b>5.00</b>
57.2%	3.40	4.20	4.99	5.86	6.51	<b>7.00</b>



(a) Temps de résolution.

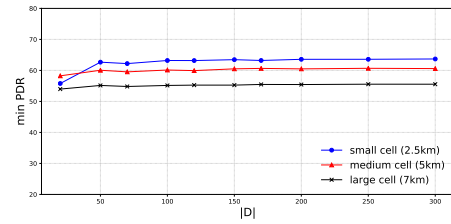
(b) PDR minimum en fonction du nombre d'échantillons  $|D|$ .

FIGURE 3: Impact du nombre d'échantillons.

et moyennes cellules où les collisions ont un fort impact, nous améliorons grandement le PDR minimum en passant de 0.21 à 63.6% pour la petite cellule, et de 8.63 à 60.73% dans la moyenne (Figures 2a et 2b). Cela permet à des centaines de nœuds d'atteindre un taux de perte convenable. Dans les grandes cellules, le gain est moins important mais représente un gain de 13% pour les nœuds les plus lointains (de 42 à 55.64%) (Figure 2c). Après optimisation, très peu de nœuds utilisent SF12, alors que la zone de SF7 a augmenté, en comparaison aux bornes basées sur le SNR. L'effet négatif des collisions dans la zone proche de la passerelle est ainsi contre-balancé par le gain des nœuds distants. Globalement plus de 50% des nœuds voient leur PDR augmenter par rapport à celui obtenu avec des bornes basées sur SNR.

Le nombre d'échantillons  $|D|$  est un paramètre clé dans notre modèle. Augmenter cette valeur de 1 augmente notre modèle de  $(|SF|(1 + |D|))$  nouvelles variables. Le temps de résolution de notre modèle est ainsi fortement dépendant de cette valeur comme l'on peut le voir sur la figure 3a. Néanmoins, notre modèle nécessite uniquement un faible nombre d'échantillons pour converger vers une valeur précise de PDR en moins de 100 secondes. Sur la Figure 3b nous pouvons voir que la différence du PDR minimum garanti pour tous les nœuds est inférieure à 1% entre le modèle avec 50 et celui avec 300 échantillons de distance. Ainsi nous garantissons une solution efficace obtenue rapidement grâce à notre modèle.

## 4 Conclusion

Nous présentons un modèle d'optimisation pour répartir les SF de manière à obtenir un PDR équitable pour tous les nœuds du réseau indépendamment de leur distance à la passerelle. Nous basons notre programme linéaire sur un modèle représentatif du PDR pour les nœuds en tenant compte des collisions et de l'effet de capture. Les résultats montrent l'efficacité de notre approche qui permet d'équilibrer efficacement l'effet de l'atténuation et des collisions.

Nous pouvons néanmoins améliorer encore ces résultats, en particulier lorsque le PDR calculé pour un SF est plus haut que pour les SFs qui l'entourent (par exemple sur la figure 2a pour SF11). Un ajustement précis de ces bornes permettrait d'améliorer la répartition des nœuds avec le même PDR garanti.

## Références

- [AKRG19] L. Amichi, M. Kaneko, N. E. Rachkidy, and A. Guitton. Spreading factor allocation strategy for LoRa networks under imperfect orthogonality. In *ICC*, May 2019.
- [CHR19] C. Caillouet, M. Heusse, and F. Rousseau. Optimal SF allocation in lorawan considering physical capture and imperfect orthogonality. In *IEEE GLOBECOM*, pages 1–6, December 2019.
- [GR17] O. Georgiou and U. Raza. Low power wide area network analysis : Can LoRa scale? *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(2) :162–165, April 2017.
- [HAC<sup>+</sup>20] M. Heusse, T. Attia, C. Caillouet, F. Rousseau, and A. Duda. Capacity of a lorawan cell. In *MSWiM*, pages 131–140, November 2020.
- [ZPM<sup>+</sup>18] D. Zorbas, G. Z. Papadopoulos, P. Maillé, N. Montavont, and C. Douligieris. Improving LoRa network capacity using multiple spreading factor configurations. In *ICT*, pages 516–520, June 2018.